

CÓDIGO 1.3.06

INTEGRACIÓN SOSTENIBLE DE ÁREAS INDUSTRIALES Y URBANAS MEDIANTE MODELADO BASADO EN AGENTES

Ruiz, M^a Carmen, Romero, Elena*

Universidad de Cantabria, ETSI Industriales y Telecomunicación,
Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos,
Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión de Proyectos (INGEPRO).
mdelcarmen.ruiz@unican.es
elena.romero@unican.es

PALABRAS CLAVE: Modelo Basado en Agentes, Simbiosis Industrial, Regeneración Urbana.

RESUMEN

El modelado basado en agentes es una técnica empleada en la representación de sistemas complejos. El sistema se define en función de las entidades -agentes- que lo componen y sus reglas de comportamiento. Ampliamente utilizada en el área de la computación, la aplicación de esta técnica está cada día más extendida en diversos campos de conocimiento como las ciencias ambientales, ingeniería o ciencias sociales. Esta contribución se apoya en un modelo basado en agentes diseñado para la regeneración de áreas industriales. En el modelo se plantea la implementación de estrategias de simbiosis industrial entre los agentes del área, representadas mediante sustitución de recursos por residuos o por la reutilización de agua en cascada. La evolución del sistema se estudia de acuerdo a las características concretas de los agentes y de sus mecanismos de relación. Pero además, el tejido industrial se encuentra inmerso en un entorno formado por agentes de naturaleza social, económica y ambiental, que influyen en su evolución y cuya repercusión debe ser considerada en el modelo. La representación del entorno socio-económico más cercano al sistema industrial, el núcleo urbano, se integra con un nuevo módulo en el modelo. Este módulo incorpora el metabolismo urbano en el análisis de los flujos de materia, agua y energía, permitiendo plantear el desarrollo de estrategias cooperativas de intercambio entre ambos sistemas, como por ejemplo, la creación de redes urbanas de calefacción o el aprovechamiento y gestión de residuos urbanos en empresas industriales. Complementariamente, se valora la influencia de las políticas locales en el desarrollo e implementación de este tipo de estrategias. Se obtiene así una herramienta de diagnóstico y análisis conjunto del sistema industrial y urbano que facilita la propuesta y activación de actuaciones técnicas y políticas para la regeneración y puesta en valor de ambos tejidos hacia unos objetivos de sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Los nuevos diseños de sistemas urbanos e industriales buscan modelos más sostenibles y eficientes, capaces de cubrir las necesidades de la sociedad actual. Sobre estas premisas se desarrollan los campos de conocimiento de la *Ecología Urbana* (EU) y la *Ecología Industrial* (EI). La EU analiza cómo los procesos humanos y ecológicos pueden coexistir dentro de los sistemas hechos por el hombre, y por tanto alcanzar sociedades más sostenibles [1,2]. Las áreas urbanas se tratan de sistemas abiertos con un constante intercambio de flujos de materia y energía con su entorno. Por tanto, el estudio de su metabolismo favorecerá la cuantificación de sus flujos, así como la minimización de los impactos que causan al entorno

[3,4]. Por otro lado, la *EI* pretende la aproximación de los sistemas industriales tradicionales hacia modelos más eficientes, cuyo funcionamiento se asemeje al de los ecosistemas naturales. Esta teoría busca el cierre de las cadenas lineales de producción y consumo para conseguir sistemas más eficientes [5, 6, 7]. En esencia, ambas teorías buscan mejorar los sistemas socio-económicos hacia estadios sostenibles a través de una misma metáfora “su estudio como ecosistema”.

Si bien, el estudio y aplicación de ambas teorías se realiza de forma independiente, un enfoque más ambicioso consiste en su combinación para el diseño de modelos urbanos e industriales. Un estudio integrador de ambos sistemas puede conseguir sistemas socio-económicos más sostenibles. Ejemplos de esta combinación son las experiencias de simbiosis industrial en Kalundborg (Dinamarca) o Göteborg (Suecia). La primera experiencia integra el complejo industrial con el municipio de Kalundborg. Las empresas intercambian subproductos de sus procesos industriales, como por ejemplo yeso, cenizas de combustión o lechada de levadura. Además, la central eléctrica del complejo suministra electricidad y calefacción de distrito al municipio, cuyos residuos se emplean para la generación de biogás y compost para la regeneración de suelos, así como el agua urbana depurada usada en cascada en el complejo [8]. En la segunda experiencia, el municipio de Göteborg posee un sistema de calefacción de distrito de más de 400km, cuyas fuentes de suministro consisten en una planta de incineración, las bombas de calor de la planta de tratamiento de aguas residuales, y el calor residual de varias industrias de proceso cercanas [9].

El trabajo de los autores hasta la fecha se ha ocupado del modelado del sistema industrial [10, 11], no obstante, siempre se ha tenido en consideración la integración del sistema urbano en el modelo de análisis como previsible línea de trabajo [12]. La presente comunicación pretende contribuir con una integración preliminar del sistema urbano en el modelo eco-industrial previo. Su estudio combinado soporta el diseño de modelos más sostenibles y cooperativos que favorezcan la regeneración de zonas socio-económicas degradadas. Para ello, esta comunicación se estructura de la siguiente manera: el apartado 2 resume las características principales de la técnica empleada en el modelo formal, tanto en el de eco-parque como en el propuesto para el sistema urbano; el apartado 3 se centra en la revisión de las características principales del modelo eco-industrial; el apartado 4 se ocupa de la descripción del sistema urbano mediante la técnica de modelado basado en agentes, así como de su integración con el modelo eco-industrial y posterior implementación; el apartado 5 se reserva para recoger las conclusiones generales del estudio.

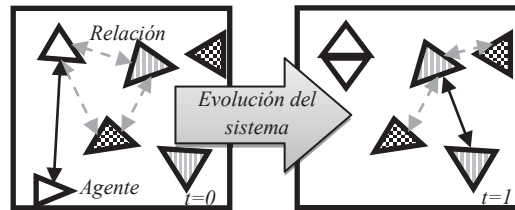
2. MODELADO BASADO EN AGENTES

Los sistemas socio-económicos, al igual que los ecológicos, se clasifican como sistemas adaptativos complejos [13]. Estos sistemas se caracterizan por su emergencia, capacidad de adaptación, auto-organización y desarrollo de relaciones no lineales. El comportamiento complejo del sistema emerge como resultado de las interacciones entre los componentes del sistema y de estos con su entorno [13].

El Modelado Basado en Agentes (MBA) es un método de modelado de sistemas complejos. Estos sistemas están formados por entidades individuales, las cuales causan el comportamiento global del sistema mediante sus interacciones y relación con el entorno [14, 15, 16]. Estas entidades individuales son autónomas, heterogéneas e independientes, caracterizadas por ciertos atributos o propiedades y con capacidad de interactuar entre sí, relacionándose según sus reglas de comportamiento. Además, tienen la capacidad de adaptarse ante cambios externos que sufra su entorno para mantenerse durante las nuevas condiciones de operación. Estas entidades pueden ser agrupadas en diferentes categorías con características comunes, formando así la población de estudio. La Tabla 1 resume las características principales de esta técnica de modelado.

Tabla 1: Resumen de las características del MBA (adaptado de [11]).

Características	MODELADO BASADO EN AGENTES (MBA)
Aproximación de modelado	Inductivo. La inferencia se realiza desde el comportamiento de los agentes al comportamiento del sistema.
Unidad de análisis	Reglas de los agentes. El comportamiento del sistema emerge del comportamiento de los agentes y sus interacciones.
Bloques constructivos	Agentes. Entidades individuales que forman el sistema.
Variable temporal	Discreta. La variable temporal es discreta.
Expresión formal	Sentencias lógicas que definen las reglas de comportamiento de los agentes, pueden tratarse de sencillas sentencias condicionales, hasta algoritmos matemáticos más complejos basados en la teoría de juegos.
Representación del modelo	Población de los agentes formado por entidades autónomas, heterogéneas e independientes con sus propios objetivos, propiedades y habilidades sociales para interactuar entre ellos y con su entorno.
Representación gráfica	Representación individual de los agentes que forman el sistema y de sus relaciones.



3. MODELO ANALÍTICO ECO-INDUSTRIAL

El modelo analítico eco-industrial según MBA [11], pretende apoyar el proceso de transformación de áreas industriales tradicionales hacia formas de operación más eficientes y sostenibles, como los sistemas eco-industriales propuestos por la EI. La mejora de la operación del área industrial, tanto económica como ambientalmente, se basa en el desarrollo de relaciones de cooperación basadas en la simbiosis industrial, como el intercambio de flujos materiales. En la evolución de estas relaciones se debe vigilar que, tanto el beneficio económico global (GEP_{EIP}) como el impacto ambiental global (GEI_{EIP}), alcanzados mediante la cooperación sean más favorables que la suma de los efectos individuales sin cooperar, es decir, mayor en el caso de beneficio económico (EP_{Ai}) y menor en el caso de impacto ambiental (EI_{Ai}), según se expresa en las ecuaciones generales (1) y (2), e indicadores complementarios detallados en [11].

$$\max(GEP_{EIP}) > \sum_{i=1}^N \max(EP_{Ai}) \quad (1)$$

$$\min(GEI_{EIP}) < \sum_{i=1}^N \min(EI_{Ai}) \quad (2)$$

Los agentes del modelo eco-industrial representan empresas individuales con sus propios objetivos. Estos agentes se caracterizan por unas propiedades (3) relacionadas con los flujos materiales y energéticos que consumen como recursos (R), y que producen como productos o residuos (P y W , respectivamente). Estas propiedades se describen cualitativa (t) y cuantitativamente, indicando cantidades (q) y costes (c) de los mismos, así como su beneficio económico (Ep). Se definen unas propiedades sociales que representan la perspectiva de la empresa frente a aspectos estratégicos, económicos y medioambientales. Estas

propiedades sociales categorizan la población de agentes, limitada en el modelo a tres tipologías de agente empresa “tradicional”, “ecológico” e “innovador” [11].

$$\text{Propiedades } A_{\text{empresa Relativas-flujos}} = \{[Rt], [Rq], [Rc], [Wt], [Wq], [Wc], [Pt], [Pq], [Pc], [Ep]\}_{A_i} \quad (3)$$

El desarrollo de la red de intercambios se basa en la existencia de dos flujos materiales (recurso y residuo) compatibles para el intercambio (Figura 1). Para ello, en el modelo se integra una base de conocimiento que relaciona flujos de materias primas con flujos residuales capaces de sustituirlos, obtenido de la revisión de experiencias de simbiosis industrial. Una vez detectadas en el modelo dos empresas con flujos materiales compatibles para llevar a cabo el intercambio, se procede a su evaluación. Según la tipología de los agentes, sus estrategias de cooperación buscan satisfacer diferentes objetivos (económico, medio ambiental o estratégico). Así, de acuerdo a las reglas de comportamiento de las que se dota a los agentes, se llega al acuerdo de intercambio. Esta nueva situación se refleja en la estructura de los agentes actualizando sus propiedades respectivas. Este mecanismo de adaptación también se ejecuta cuando el sistema sufre un impacto del entorno que altera las propiedades de sus agentes.

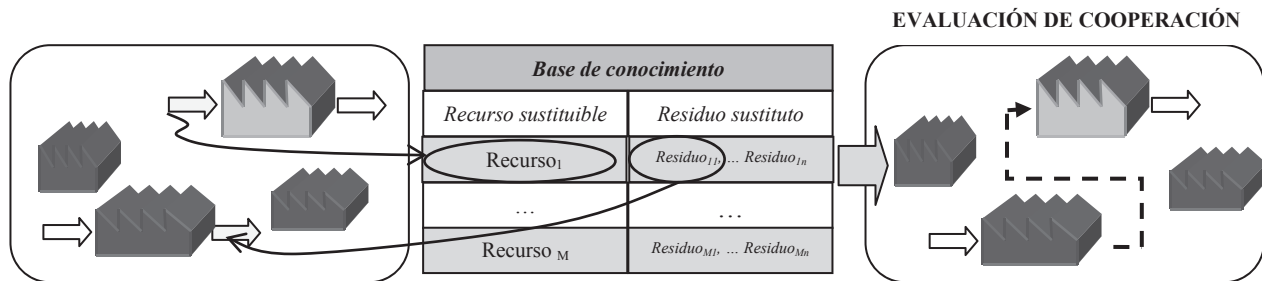


Figura 1: Evaluación de intercambios materiales (adaptación de [11]).

4. PROPUESTA DE MODELO INTEGRADOR ECO-INDUSTRIAL Y URBANO

Siguiendo el planteamiento propuesto en [10], el sistema eco-industrial se conceptualiza embebido en un entorno de sistemas anidados (económico, social y natural). En esta propuesta, la representación conceptual del modelo integrador precisa detallar además el sistema urbano. Este sistema, perteneciente al entorno social, se representa a través de sus agentes más distintivos y flujos circulantes (Figura 2).

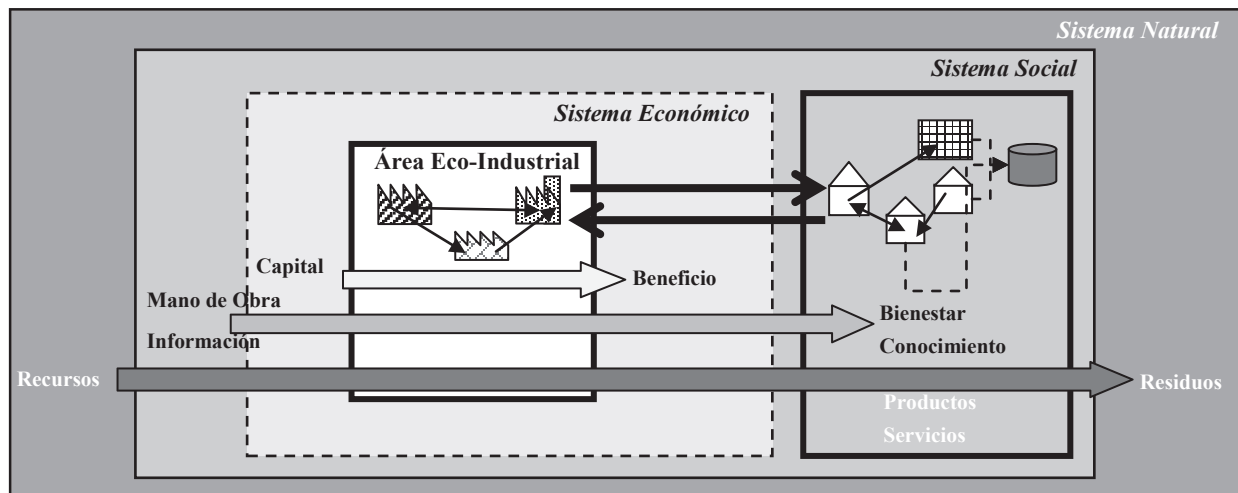


Figura 2: Sistema eco-industrial y urbano (adaptación de [10]).

4.1 Objetivo del modelo analítico integrador

El objetivo de la simulación consiste en valorar los beneficios obtenidos por la integración del subsistema urbano en la red cooperación. En el modelo eco-industrial el estudio se planteaba relacionando el beneficio económico global en la situación de cooperación con respecto a la situación de no intercambio. Sin embargo, en el sistema urbano la comparación de la situación económica se debe plantear como la variación en los costes de consumo y gestión, magnitudes más adecuadas ya que el objetivo del sistema urbano no es la producción. Siguiendo estas premisas, a continuación se proponen los indicadores globales que valoran la evolución del modelo integrador.

La ecuación (4) muestra el indicador global de mejora económica (*IGME*). Este indicador mide la mejora económica a través de la variación de los gastos (*G*) comprometidos en las situaciones de cooperación (*coop.*) y de no cooperación (*no-coop.*), debido al gasto efectuado en el consumo de recursos naturales (*RC*) y en la gestión de los residuos generados (*WC*). El índice es adimensional y menor de la unidad. Cuanto menor sea, mejor será la situación económica.

$$IGME = \frac{\sum_{i=1}^N G_{A_i} \Big|_{coop.}}{\sum_{i=1}^N G_{A_i} \Big|_{no-coop.}} = \frac{\sum_{i=1}^N RC_{A_i} \Big|_{coop.} + \sum_{i=1}^N WC_{A_i} \Big|_{coop.}}{\sum_{i=1}^N RC_{A_i} \Big|_{no-coop.} + \sum_{i=1}^N WC_{A_i} \Big|_{no-coop.}} \quad (4)$$




La ecuación (5) muestra el indicador global de impacto ambiental (*IGIA*). En este caso, el planteamiento del mismo no difiere en gran medida al planteado para el caso eco-industrial aislado. Este indicador compara el impacto ambiental (*IA*) en las situaciones de cooperación (*coop.*) y de no cooperación (*no-coop.*), según la variación en la cantidad consumida de recursos al entorno natural (*RQ*) y en la cantidad generada de residuos que serán vertidos al entorno (*WQ*). El índice es adimensional y menor de la unidad. Cuanto menor sea, mejor será la situación medio ambiental del sistema integrador.

$$IGIA = \frac{\sum_{i=1}^N IA \Big|_{coop.}}{\sum_{i=1}^N IA \Big|_{no-coop.}} = \frac{\sum_{i=1}^N RQ_{A_i} \Big|_{coop.} + \sum_{i=1}^N WQ_{A_i} \Big|_{coop.}}{\sum_{i=1}^N RQ_{A_i} \Big|_{no-coop.} + \sum_{i=1}^N WQ_{A_i} \Big|_{no-coop.}} \quad (5)$$

4.2 Población de agentes del modelo analítico integrador

La definición del módulo urbano requiere enunciar otras tipologías de agentes que intervendrán en el modelo. Si bien las tipologías de agentes del sistema eco-industrial se diferenciaban por sus propiedades sociales, en el sistema urbano los agentes propuestos se diferencian principalmente por las características de los flujos materiales y energéticos que consumen y generan. La Tabla 2 resume las características principales que diferencian a las tres tipologías que forman la población de agentes urbanos.

Tabla 2: Población de agentes urbanos propuestos que forman el sistema.

Agentes urbanos		Características
	<i>Agente residencial</i>	Núcleos de población, urbanizaciones, barrios. Se caracterizan por tener unos flujos materiales de consumo y generación de residuos más relevantes que cualquier agente, mientras que los consumos energéticos son moderados.
	<i>Agente servicios</i>	Locales comerciales o servicios municipales. Se caracterizan por tener unos flujos materiales escasos, y flujos energéticos moderados.
	<i>Agente gestión</i>	Planta de incineración, depuradoras, plantas de tratamiento. Se encargan del tratamiento de flujos residuales, favoreciendo su reutilización y aprovechamiento energético.

Esta definición preliminar de los agentes urbanos no contempla la consideración de propiedades sociales. Si bien, la definición de las propiedades relativas a los flujos se considera esencial para la formalización del modelo. Estas propiedades (6), mantienen la estructura propuesta en el modelo eco-industrial en relación a las características de los flujos de recursos consumidos (R), y de los residuos generados (W), indicando tipo, cantidad y coste unitario (t , q y c , respectivamente). Estas seis propiedades se complementan con el planteamiento de dos magnitudes integradoras: la propiedad de gasto económico en su consumo de recursos y gestión de residuos (G), expresada en la ecuación (7); y la propiedad de impacto ambiental (IA) evaluando las respectivas cantidades consumidas y generadas, ecuación (8).

$$\text{Propiedades } A_{\text{urbano Relativas-flujos}} = \{[Rt]_b, [Rq]_b, [Rc]_b, [Wt]_b, [Wq]_b, [Wc]_b, [G]_b, [IA]_b\}_{A_i} \quad (6)$$

$$G_{A_i} = RC_{A_i} + WC_{A_i} = [Rq]_{A_i} \cdot [Rc]_{A_i}^T + [Wq]_{A_i} \cdot [Wc]_{A_i}^T \quad (7)$$

$$IA_{A_i} = RQ_{A_i} + WQ_{A_i} = [\sum Rq]_{A_i} + [\sum Wq]_{A_i} \quad (8)$$

4.3 Paradigma de interacción y capacidad de adaptación del modelo analítico integrador

La interacción entre los agentes urbanos e industriales seguirá las premisas planteadas en el apartado 3. Los flujos materiales de ambos sistemas son evaluados de acuerdo a la base de conocimiento. Una vez detectados los flujos compatibles para el intercambio, se procede a la valoración de utilidad que le ofrece a cada agente la cantidad de flujo residual intercambiada (q_x). La definición de la utilidad para los agentes industriales, tal y como se expone en [11] no se puede extrapolar para los agentes del sistema urbano. En este caso, la utilidad de un intercambio para un agente urbano se plantea en (9) como la combinación de la utilidad económica del intercambio ($iG_{Aiurbano}$) y de la utilidad ambiental del intercambio ($iIA_{Aiurbano}$), ponderados por unos coeficientes asociados al tipo de agente urbano que participa en el intercambio.

$$P(q_x)_{A_iurbano} = \varphi_{A_i} \cdot iG(q_x)_{A_iurbano} + \mu_{A_i} \cdot iIA(q_x)_{A_iurbano} \quad (9)$$

Tabla 3: Descripción de los elementos de la expresión de utilidad para agentes urbanos.

Términos	Expresión
Índice de Gasto para agente urbano	$iG_{A_iurbano} = \frac{G(q_x)_{A_iurbano} _{coop.}}{G_{A_iurbano} _{no-coop.}}$
Índice de Impacto ambiental para agente urbano	$iIA_{A_iurbano} = \frac{IA(q_x)_{A_iurbano} _{coop.}}{IA_{A_iurbano} _{no-coop.}}$
Coeficiente de ponderación del Gasto económico	$\varphi_{A_i} \in (0,1)$, Si $A_{iurbano} \in (A_{residencial}, A_{servicios}) \rightarrow \varphi_{A_i} > \mu_{A_i}$
Coeficiente de ponderación del Impacto ambiental	$\mu_{A_i} \in (0,1)$, Si $A_{iurbano} \in (A_{gestión}) \rightarrow \mu_{A_i} > \varphi_{A_i}$

Formalizado el intercambio entre los agentes urbanos e industriales, la estructura de sus propiedades debe ser actualizada a la nueva situación. Para ello, las propiedades relativas al flujo (6) se modifican, integrando como un nuevo elemento el tipo de flujo intercambiado (en Rt o Wt), su cantidad (en Rq o Wq) y coste unitario (en Rc o Wc), así como los respectivos flujos de recursos o de residuos ahorrados.

4.4 Implementación del modelo computacional integrador

Finalmente, el modelo analítico se implementa computacionalmente para completar las etapas de validación, verificación y testeo. La plataforma escogida para este modelo integrador, es la misma que la utilizada para el modelo eco-industrial, NetLogo® (Uri Wilenski), de acuerdo a su versatilidad y fácil manejo. El modelo eco-industrial se programó, verificó y validó usando el caso de estudio de Kalundborg (resultados aún no publicados).

Si bien, la implementación del nuevo módulo urbano implica la adaptación de ciertos procedimientos del modelo eco-industrial. Por un lado, la introducción de nuevo código para la definición de los agentes urbanos, sus tipologías, propiedades y la valoración de sus utilidades (punto 4.2 y 4.3), así como para la descripción de los indicadores que medirán la evolución del sistema (puntos 4.1). Por otro lado, la modificación de procedimientos existentes, como el relativo a la evaluación de los flujos materiales para su intercambio (punto 4.3), el cual debe adaptarse a la evaluación de las nuevas propiedades de los agentes urbanos. Actualmente, se está trabajando en la implementación de estas modificaciones para proceder seguidamente con su verificación y validación. La Figura 3 muestra la apariencia del programa NetLogo® con la representación de las diferentes tipologías de agente urbano e industrial.

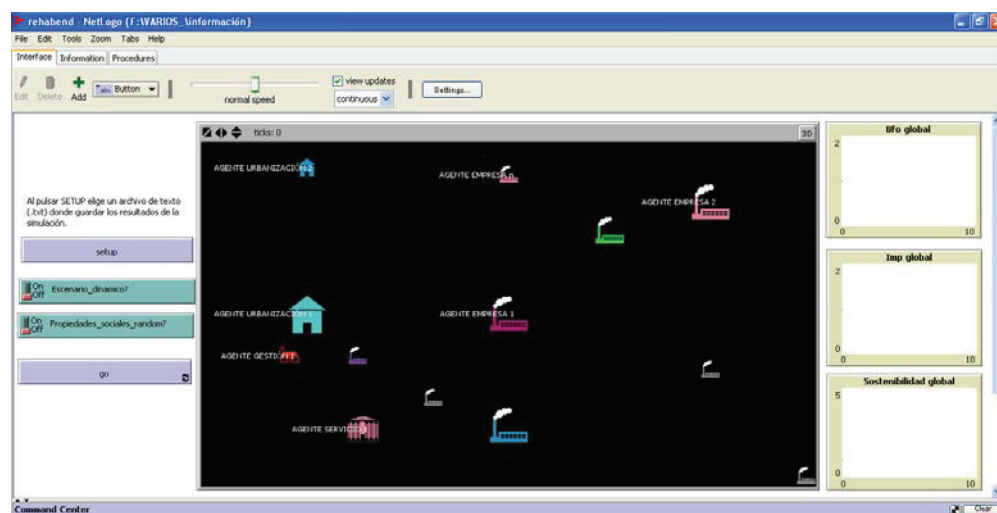


Figura 3. Representación de los agentes urbanos e industriales en el modelo computacional de NetLogo®.

5. CONCLUSIONES

Basándose en las premisas de la *EU* y *EI*, esta contribución plantea el estudio integrado de los sistemas industriales y urbanos como medio para alcanzar sociedades más eficientes y sostenibles, a través del intercambio de sus flujos residuales. A partir del trabajo previo de los autores [10, 11], centrado en el modelado de sistemas eco-industriales según la técnica MBA, en esta comunicación se plantea la integración de un nuevo módulo relativo al sistema urbano para realizar el estudio conjunto.

El modelo preliminar propuesto precisa de la definición de nuevas tipologías de agentes capaces de describir los componentes del sistema urbano y sus comportamientos, así como del establecimiento de los objetivos globales para estudiar la evolución del modelo conjunto. Tras esta descripción analítica, es precisa su implementación computacional, etapa en la que actualmente se está trabajando. La validación de este modelo integrador revelará su adecuación como herramienta de análisis y diagnóstico acerca de la integración sostenible de sistemas industriales y urbanos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Newman, P.W.G. Sustainability and cities: extending the metabolism model. *Landscape and urban planning*. Vol. 44 (1999).
- [2] Marzluff, J.M., Schulenberger E., Endlicher, W., Alberti, M., Bradley, G., Ryan, C., ZumBrunnen, C., Simon, U. *Urban Ecology. An international perspective on the interaction between humans and nature*. Springer Science + Business Media, LLC, New York, 2008.
- [3] Zhang, Y., Yang, Z., Yo, X. Ecological network and emergy analysis of urban metabolic systems; Model development, and a case study of four Chinese cities. *Ecological Modelling*, Vol. 220 (2009).
- [4] Hendriks, C., Müller, D., Kytzia, S., Baccini, P., Brunner, P. Material flow analysis: a tool to support environmental policy decision making. Case-studies on the city of Vienna and the Swiss lowlands. *Local Environment*, Vol. 5/3 (2000).
- [5] Graedel T.E., Allenby B.R. *Industrial Ecology*. AT&T Pearson Education, Inc., New Jersey, 2003.
- [6] Lambert, A.J.D., Boons F.A. Eco-industrial parks: stimulating sustainable development in mixed industrial parks. *Technovation* Vol. 22 (2002).
- [7] Gibbs, D., Deutz, P. Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 15 (2007).
- [8] Kalundbog Symbiosis. <http://www.symbiosis.dk/en> (12/07/2013).
- [9] Munier, N. *Introduction to sustainability. Road a better future*. Springer, Dordrecht, 2005
- [10] Romero, E., Ruiz, M.C. Framework for applying a complex adaptive system approach to model the operation of eco-industrial parks. *Journal of Industrial Ecology* (2013). doi: 10.1111/jiec.12032
- [11] Romero, E., Ruiz, M.C. Proposal of an agent-based analytical model to convert industrial areas in industrial eco-systems. *Science of the Total Environment*. Vol. 468-469 (2014).
- [12] Ruiz, M.C., Romero E., Fernández, J.R., 2010. Urban and industrial metabolism: Towards sustainable planning. *Proceedings of the World Congress on Housing*, Santander, Spain, October 26 to 29 2010.
- [13] Rammel, C., Stagl, S., Wilfing, H. Managing complex adaptive systems – A co-evolutionary perspective on natural resource management. *Ecological Economics*. Vol. 63 (2007).
- [14] Scholl, H.J. Agent based and system dynamics modeling: A call for cross study and joint research. *Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, Hawaii, January 3 to 6 2001.
- [15] Borschev, A., Filippov, A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: Reasons, techniques, tools. *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society*, Oxford, England, July 25 to 29 2004.
- [16] Barbati, M., Bruno, G., Genovese, A. Applications of agent-based models for optimization problems: A literature review. *Expert Systems with Applications*. Vol. 39 (2012).